

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



Bakalářská práce

Liberec 2011

Milan Špráchal

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Měření impedance napájecí sítě

Power grid impedance measurement

Bakalářská práce

Studijní program: B2612 – Elektronika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační
řídící systémy

Pracoviště: Ústav mechatroniky a technické
informatiky

Fakulta mechatroniky, informatiky a
mezioborových studií

Technická univerzita v Liberci
Studentská 2, 416 17 Liberec

Autor: Milan Špráchal

Vedoucí: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické
informatiky

Konzultant: Ing. Jiří Kubín, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické
informatiky

Rozsah bakalářské práce: Počet stran: 36

Počet obrázků: 17

Originál zadání

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Miroslavu Novákovi Ph.D. a panu Ing. Jiřímu Kubínovi Ph.D. za jejich ochotnou pomoc a cenné rady při realizaci této bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za podporu při studiu.

Anotace

Cílem této bakalářské práce je seznámit se teoreticky s měřením impedance napájecí sítě v normálním provozním stavu a provést rešerši používaných metod měření impedance. Následně sestavit ze standardních měřících přístrojů aparaturu vhodnou k měření, které bude probíhat jako automatizované řízené počítačem a v závěru této práce statisticky zpracovat naměřená data.

klíčová slova

impedance napájecí sítě, měření impedance napájecí sítě, napájecí síť, impedance

Abstract

The aim of this Bachelor thesis is learn in theory about with power grid impedance measuring in normal operating state and make search for used methods for impedance measuring. Subsequently, assemble from standard measurement devices suitable for the measurement apparatus, which will run as an automated, computer controlled, and in conclusion statistically execute measured data.

Keywords

impedance of power grid, power grid impedance measurement, power grid, impedance

Obsah

| | |
|--|-----------|
| PROHLÁŠENÍ | 4 |
| PODĚKOVÁNÍ | 5 |
| ANOTACE | 6 |
| ABSTRACT | 7 |
| OBSAH..... | 8 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 10 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 11 |
| ÚVOD | 12 |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST | 13 |
| 1.1 IMPEDANCE..... | 13 |
| 1.2 NÁHRADNÍ OBVOD IMPEDANCE NAPÁJECÍ SÍTĚ | 15 |
| 1.3 MĚŘENÍ IMPEDANCE | 15 |
| 1.3.1 PASIVNÍ METODA MĚŘENÍ IMPEDANCE SÍTĚ | 16 |
| 1.3.2 AKTIVNÍ METODA MĚŘENÍ IMPEDANCE SÍTĚ | 17 |
| 1.3.3 REZONANČNÍ METODA MĚŘENÍ IMPEDANCE SÍTĚ | 17 |
| 2 NÁVRH MĚŘICÍ APARATURY PRO MĚŘENÍ IMPEDANCE NAPÁJECÍ SÍTĚ | 19 |
| 2.1 NÁVRH MĚŘICÍ APARATURY PRO MĚŘENÍ IMPEDANCE SÍTĚ..... | 19 |
| 2.2 POPIS OVLÁDACÍHO PŘÍPRAVKU..... | 21 |
| 2.3 MĚŘICÍ KARTA NI-DAQ USB 6251 | 21 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 3 | VLASTNÍ MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DATA | 23 |
| 3.1 | POPIS MĚŘENÍ IMPEDANCE NAPÁJECÍ SÍTĚ | 23 |
| 3.1.1 | MĚŘENÍ IMPEDANCE NAPÁJECÍ SÍTĚ V ZÁSUVCE NA LABORATORNÍM STOLE..... | 26 |
| 3.1.2 | MĚŘENÍ IMPEDANCE NAPÁJECÍ SÍTĚ V ZÁSUVCE NA LABORATORNÍM STOLE S PRODLUŽOVACÍM KABELEM | 30 |
| 3.1.3 | MĚŘENÍ IMPEDANCE NAPÁJECÍ SÍTĚ V ZÁSUVCE NA ROZVODNÉ SKŘÍNI S PRODLUŽOVACÍM KABELEM | 32 |
| | ZÁVĚR..... | 34 |
| | LITERATURA | 35 |
| | SEZNAM PŘÍLOH | 36 |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr 1.1: Impedance (Z) se skládá z reálné (R) a imaginární (X) složky [1] | 13 |
| Obr 1.2: Vyjádření sériové a paralelní kombinace reálných a imaginárních komponent [1]..... | 14 |
| Obr 1.3: Reaktance ve dvou tvarech: induktivní (X_L) a kapacitní (X_C) [1]..... | 14 |
| Obr 1.4: Náhradní obvod impedance napájecí sítě | 15 |
| Obr 1.5: Náhradní obvod pro měření impedance jedné fáze pasivní metodou..... | 16 |
| Obr 1.6: Náhradní obvod pro měření impedance jedné fáze aktivní metodou. | 17 |
| Obr 1.7: Náhradní obvod pro měření impedance jedné fáze rezonanční metodou..... | 18 |
| Obr 2.1: Vypínací charakteristiky jističů [5] | 19 |
| Obr 2.2: Zapojení aparatury pro měření impedance napájecí sítě | 20 |
| Obr 2.3: Měřicí karta Ni-Daq USB 6251 | 21 |
| Obr 2.4: Měřicí karta Ni-Daq USB 6251 – svorky | 22 |
| Obr 3.1: Ukázka průběhu napětí a proudu | 29 |
| Obr 3.2: Vypočítané absolutní hodnoty fázoru impedance naměřené na laboratorním stole..... | 29 |
| Obr 3.3: Ukázka průběhu napětí a proudu | 30 |
| Obr 3.4: Vypočítané absolutní hodnoty fázoru impedance na laboratorním stole s prodlužovacím kabelem..... | 31 |
| Obr 3.5: Ukázka průběhu napětí a proudu | 32 |
| Obr 3.6: Vypočítané absolutní hodnoty fázoru impedance na rozvodné skříni s prodlužovacím kabelem | 32 |

Seznam použitých symbolů a zkratek

| Značka/Zkratka | Význam | Jednotka |
|----------------|---|------------------------|
| Z | Impedance | [Ω] |
| AC | Střídavý | - |
| X | Reaktance | [Ω] |
| θ | Fázový úhel | [°] |
| Y | Admittance | [S] |
| G | Vodivost | [S] |
| B | Susceptance | [S] |
| ω | Úhlová frekvence | [rad/s] |
| f | Frekvence | [Hz] |
| C | Kapacita | [F] |
| I | Proud | [A] |
| U | Napětí | [V] |
| FFT | Rychlá Fourierova transformace | - |
| I_n | Nominální proud | [A] |
| DC | Stejnoseměrný | - |
| P | Výkon | [W] |
| t | Čas | [s] |
| T_j | Maximální provozní teplota | [°C] |
| USB | Univerzální sériová sběrnice | - |
| U_m | Amplituda napětí | [V] |
| I_m | Amplituda proudu | [A] |
| U_{ef} | Efektivní hodnota napětí | [V] |
| I_{ef} | Efektivní hodnota proudu | [A] |
| u | Okamžitá hodnota napětí | [V] |
| i | Okamžitá hodnota proudu | [A] |
| T | Perioda | [s] |
| U | Fázor napětí | [V] |
| I | Fázor proudu | [A] |
| Z | Fázor impedance | [Ω] |
| α | Úhel | [°] |
| $ U $ | Absolutní hodnota fázoru napětí | [V] |
| $ I $ | Absolutní hodnota fázoru proudu | [A] |
| $ Z $ | Absolutní hodnota fázoru impedance | [Ω] |
| u_A | Standardní nejistota typu A | - |
| s | Směrodatná odchylka | - |
| n | Počet opakování | - |
| x | Měřená veličina | - |
| \bar{x} | Průměrná hodnota měřené veličiny | - |
| u_B | Standardní nejistota typu B | - |
| Δz | Maximální dovolená chyba zdroje chyb | - |
| Θ | Zvolená hodnota pravděpodobnostního rozdělení | - |
| u | Kombinovaná standardní nejistota | - |
| U | Rozšířená nejistota | - |
| k_u | Koeficient rozšíření | - |
| y | Vypočítávaná veličina | - |
| A_i | Koeficient citlivosti | - |
| ρ | Měrný elektrický odpor (Rezistivita) | [Ω mm ² /m] |
| S | Plocha průřezu vodiče | [mm ²] |
| l | Délka | [m] |

Úvod

Tato práce se zabývá problematikou měření impedance napájecí sítě v normálním provozním stavu, to znamená za přítomnosti napětí v měřeném obvodu.

Impedanci sítě je nutné znát z mnoha různých důvodů. Jedním z nich je například jističení, kde při vysoké hodnotě impedance sítě nevznikne dostatečně velký zkratový proud a jistič „nerozpozná“ zkrat a nerozpojí obvod. Dalším důvodem, proč znát velikost impedance sítě, kde parazitní impedance sítě hraje nezanedbatelnou úlohu.

Cílem této bakalářské práce je sestavit měřicí aparaturu, odzkoušet funkčnost měření a vyhodnotit výsledky tohoto měření.

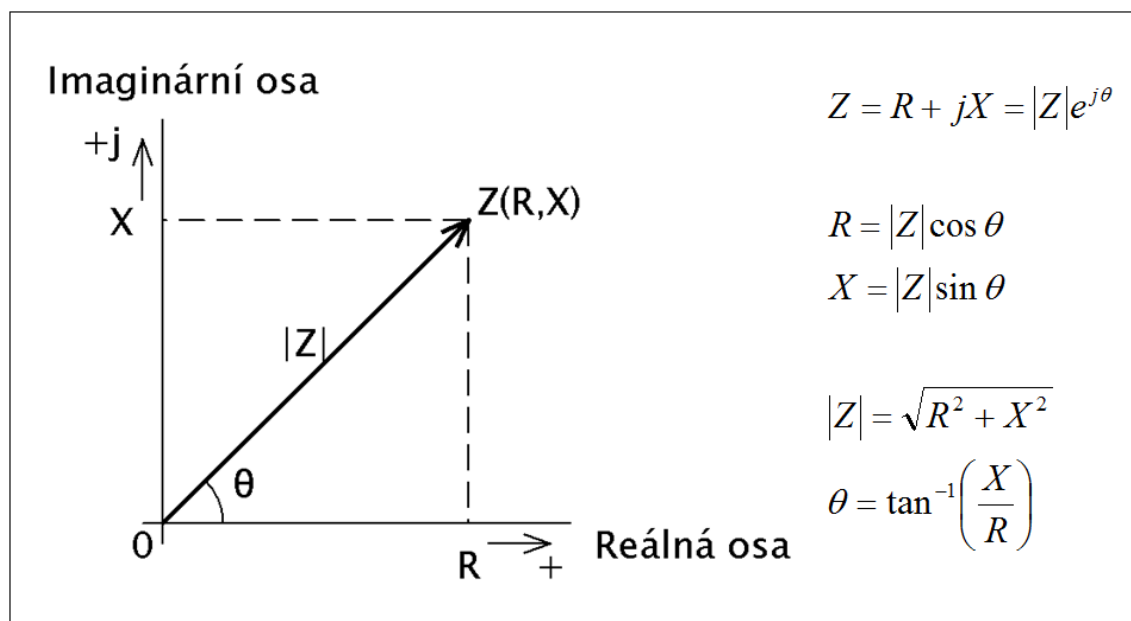
Tato práce se zabývá v teoretické části třemi metodami měření impedance napájecí sítě v normálním provozním stavu. Jedná se o pasivní metodu měření impedance sítě, kde se na krátkou dobu připojuje známá zátěž a z průběhu napětí bez připojení zátěže a průběhu napětí s připojenou zátěží známé velikosti se vyhodnocuje velikost impedance sítě. Aktivní metoda měření impedance napájecí sítě použít do sítě známý harmonický proud a sleduje se odezva síťového napětí. Poslední metodou je rezonanční metoda měření impedance napájecí sítě, která pomocí změn některých veličin uvede celý obvod do stavu rezonance a následně z hodnot měřených veličin lze vypočítat neznámá veličina, v našem případě impedance.

Práce je rozdělena na 3 hlavní části. V první části práce se seznámíme se samotnou impedancí a používanými metodami měření impedance napájecí sítě v normálním provozním stavu. Druhá část práce je zaměřena na návrh a realizaci měřicí aparatury pro měření impedance napájecí sítě v normálním provozním stavu. Třetí část práce se zabývá statistickým zpracováním a vyhodnocením naměřených výsledků.

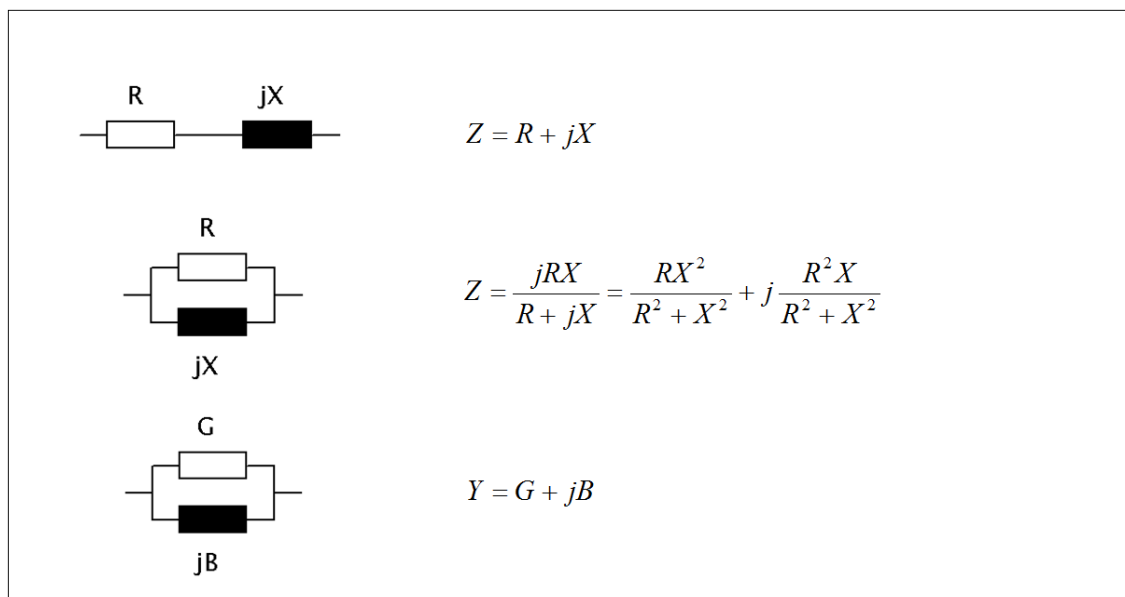
1 Teoretická část

1.1 Impedance

Impedance je důležitým parametrem používaným k popsání elektrických obvodů, součástek a materiálů používaných k výrobě těchto součástek. Impedance (Z) je obecně definována jako celkový odpor zařízení nebo obvodu působící na protékající střídavý proud (AC) dané frekvence a je reprezentovaná jako komplexní veličina, která je graficky zobrazena na vektorové rovině. To platí pouze, pokud má napětí v obvodu sinusový průběh s konstantní frekvencí, konstantní maximální amplitudou a s konstantní fází. Vektor impedance se skládá z reálné části (odpor, R) a imaginární části (reaktance, X) jak je zobrazeno na obrázku Obr. 1.1. Impedance může být popsána použitím pravoúhlého tvaru $R + jX$ nebo v polárním tvaru jako absolutní hodnota a fázový úhel: $|Z|e^{j\theta}$. Obrázek Obr. 1.1 také popisuje vztah mezi R , X , $|Z|$ a θ . V některých případech je matematicky výhodné použití obrácené hodnoty impedance. V případě $1/Z = 1/(R + jX) = Y = G + jB$, kde Y je admitance, G vodivost a B susceptance. Jednotkou impedance je ohm (Ω) a jednotkou admitance siemens (S). Impedance je běžně používaný parametr a je výhodný k reprezentování sériového zapojení odporu a cívky, protože výsledek představuje jednoduše součet R a X . Pro paralelní zapojení je výhodnější počítat s admitancí viz. Obr. 1.2 [1]

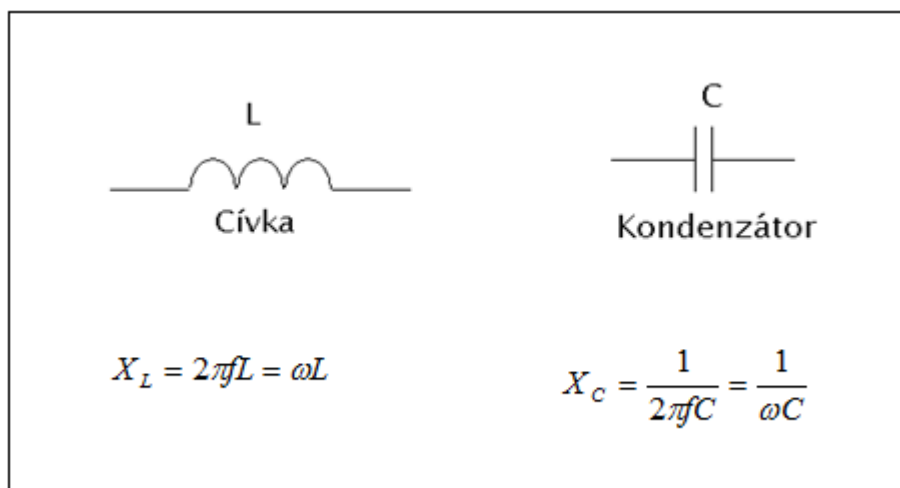


Obr 1.1: Impedance (Z) se skládá z reálné (R) a imaginární (X) složky [1]



Obr 1.2: Vyjádření sériové a paralelní kombinace reálných a imaginárních komponent [1]

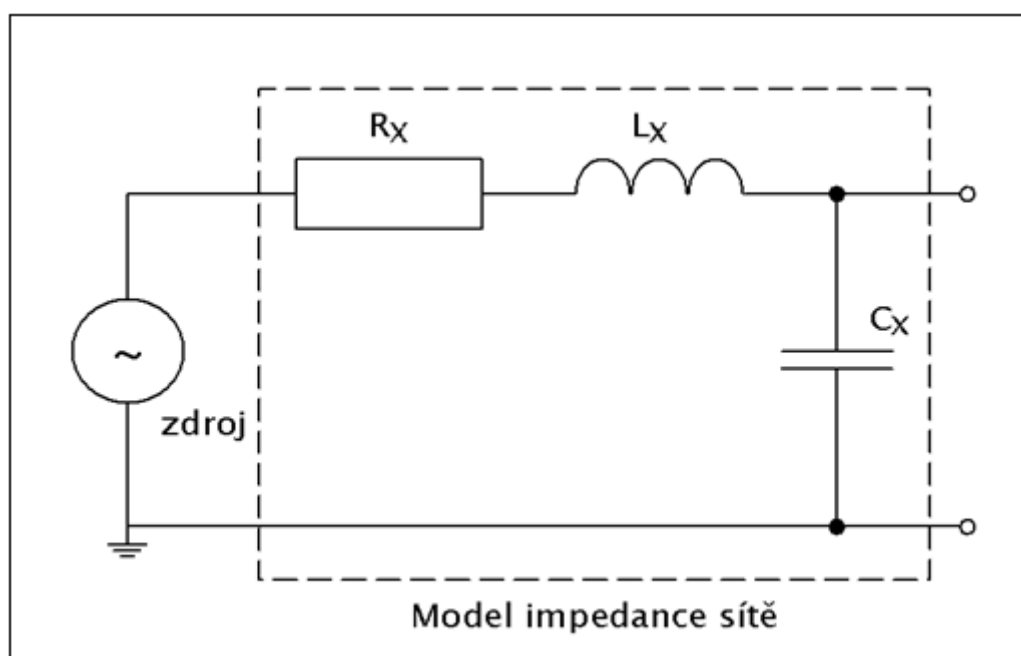
Reaktance má dva tvary: induktivní (X_L) a kapacitní (X_C). Podle definice $X_L = 2\pi fL$ a $X_C = 1/(2\pi fC)$ kde f je frekvence, L indukčnost a C kapacita. $2\pi f$ může být nahrazeno úhlovou frekvencí (ω : omega). Pak $X_L = \omega L$ a $X_C = 1/(\omega C)$ viz. Obr. 1.3 [1]



Obr 1.3: Reaktance ve dvou tvarech: induktivní (X_L) a kapacitní (X_C) [1]

1.2 Náhradní obvod impedance napájecí sítě

Náhradní obvod impedance sítě, který můžeme vidět na obrázku Obr 1.4, se skládá ze sériového zapojení odporu (R_X) a cívky (L_X) a k nim paralelně připojenému kondenzátoru (C_X). Odpor (R_X) je v reálném obvodu sítě dán odporem materiálu vedení a přechodovým odporem spojů a kontaktů, které jsou zastoupeny v různých částech rozvodné sítě. Cívka (L_X) představuje indukčnost, která je dána především indukčností sekundárního vinutí transformátoru rozvodny, ale také indukčností samotného vedení a v neposlední řadě indukčností jističího prvku v obvodu (jističe). Kondenzátor (C_X) nahrazuje parazitní kapacitu rozvodné sítě. Indukčnost daná indukčností sekundárního vinutí transformátoru má mnohem větší vliv než parazitní kapacita obvodu. Z toho vyplývá, že impedance napájecí sítě má induktivní charakter.



Obr 1.4: Náhradní obvod impedance napájecí sítě

1.3 Měření impedance

K zjištění impedance musíme měřit minimálně dvě hodnoty, protože impedance nabývá komplexních hodnot. Mnoho moderních přístrojů měřících impedanci měří reálnou a imaginární část vektoru impedance a převádějí ho do požadovaných parametrů jako $|Z|$, θ , $|Y|$, R , X , G , B , C a L . To je nutné k připojení neznámé součástky, části obvodu nebo materiálu k obvodu.[1] Toto platí obecně pouze pro měření

impedance obvodu bez zdroje, kde jediné napětí a proud jsou dodávány do obvodu měřicím přístrojem.

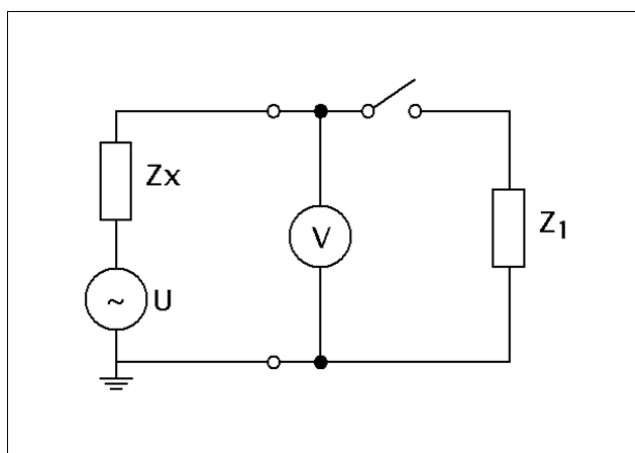
1.3.1 Pasivní metoda měření impedance sítě

Existuje mnoho metod, které mohou být použity k určení impedance napájecí sítě. Pasivní metoda, kterou můžeme vidět na obrázku Obr 1.5, kde odporová zátěž Z_1 je připojována a odpojována přepínačem, za účelem zajistit dvě různé situace v obvodu. Když je přepínač rozpojen, obvodem neprotéká žádný proud ($I_1 = 0$) a měřené napětí odpovídá fázovému napětí napájecí sítě ($U_1 = U$). V druhém případě, kdy je přepínač sepnutý, proud odpovídá I_2 a měřené napětí odpovídá napětí na zátěži U_2 [1].

S cílem vzít v úvahu frekvenční závislost impedance sítě jsou měřený proud a napětí transformovány do frekvenční oblasti pomocí algoritmu rychlé Fourierovy transformace (FFT) Impedance sítě ve frekvenční oblasti se potom spočítá takto:[1]

$$Z_X = R_X + j\omega L_X = \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1)$$

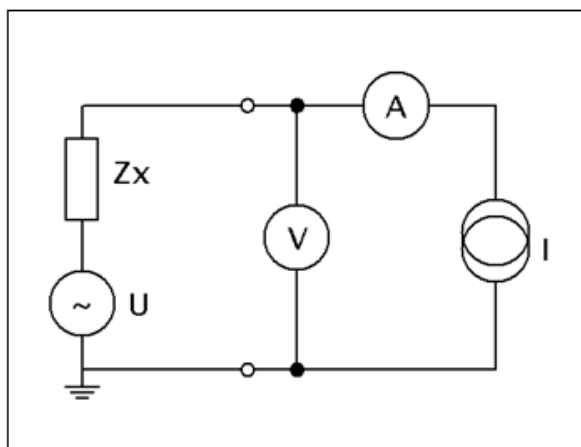
Za zmínku také stojí, že pasivní metoda je vhodná, pro rychlé získání výsledků vzhledem k omezené době rušení sítě. Tato metoda rychle vytváří přechodný proud v síti, a pak měří napětí sítě ve dvou různých časových okamžicích před a po připojení zátěže. Proud se vyhodnocuje ze známé impedance Z_1 a měřeného napětí. Zátěž „naruší“ harmonické spektrum sítě a tyto změny jsou analyzovány. Získané výsledky ukazují odezvu sítě v široké frekvenční oblasti. Z toho vyplývá, že tato metoda se hodí v aplikacích, kde musí být známy impedance při různých frekvencích [3].



Obr 1.5: Náhradní obvod pro měření impedance jedné fáze pasivní metodou.

1.3.2 Aktivní metoda měření impedance sítě

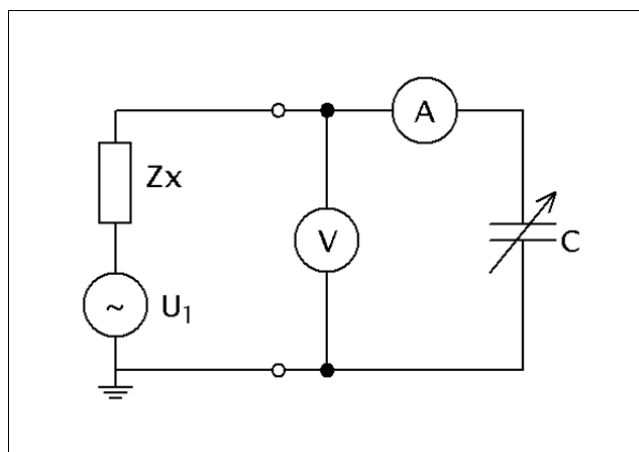
Aktivní použití do sítě periodicky známý harmonický proud a pak jej analyzuje v ustáleném stavu. Sledována je odezva změny síťového napětí. Výsledky se zpracují pomocí Fourierovy transformace. Metoda má plnou kontrolu nad přidávaným „rušivým“ proudem. Tato technika může být použita i k získání frekvenční charakteristiky impedance sítě, jestliže se touto metodou opakuje měření při různých frekvencích [3].



Obr 1.6: Náhradní obvod pro měření impedance jedné fáze aktivní metodou.

1.3.3 Rezonanční metoda měření impedance sítě

Rezonančními metodami lze měřit kapacitu (C), indukčnost (L) a frekvenci (f). Princip rezonanční metody spočívá v sestavení rezonančního obvodu a uvedení celého obvodu do stavu rezonance změnou zpravidla jedné, ale někdy i dvou zmíněných veličin (C, L, f). Neznámá veličina se potom určí ze zbývajících dvou známých veličin. Stav rezonance většinou indikuje elektronický voltmetr. Rezonance se pozná tak, že proud procházející obvodem a napětí v obvodu jsou ve fázi. Obvod ve stavu rezonance má celkovou impedanci obvodu reálnou ($X = 0 \Rightarrow Z = R + jX = R + j0 = R$).

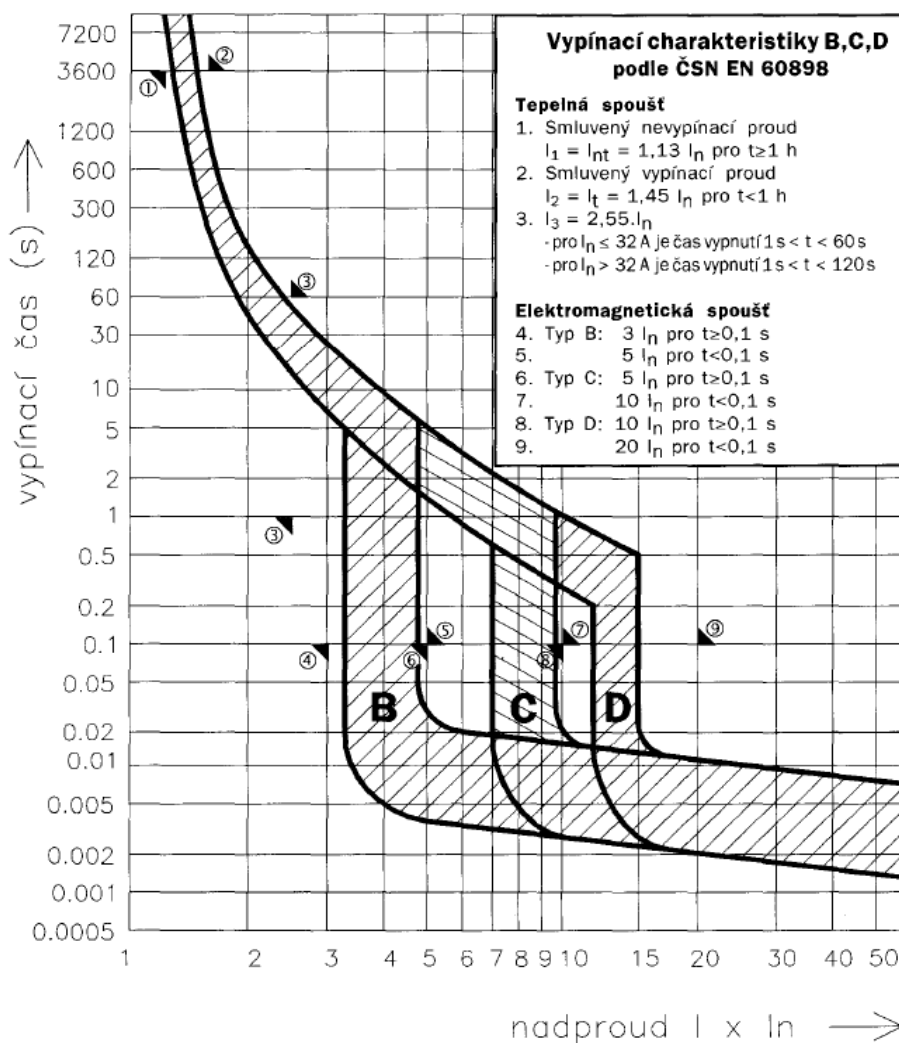


Obr 1.7: Náhradní obvod pro měření impedance jedné fáze rezonanční metodou.

2 Návrh měřicí aparatury pro měření impedance napájecí sítě

2.1 Návrh měřicí aparatury pro měření impedance sítě

V měřeném obvodu bude figurovat jistič 16 A s vypínací charakteristikou typu B viz Obr 2.1. Pro použití pasivní metody nás zajímá jakým maximálním proudem a po jak dlouhou dobu můžeme zatěžovat jistič. Řešením je najít kompromis mezi co největší velikostí proudu s co nejdelší dobou přetížení. Z obrázku vyplývá, že jistič s vypínací charakteristikou typu B snese přetížení trojnásobkem jmenovitého proudu (I_n) po dobu až 6 sekund. V našem případě se tedy jedná o proud $3 \times 16 = 48$ A, tedy i řídicí spínací polovodičový prvek bude muset být dimenzován na takto vysokou proudovou zátěž. V našem případě budeme vycházet z tohoto předpokladu také při výpočtu velikosti připojované zátěže.



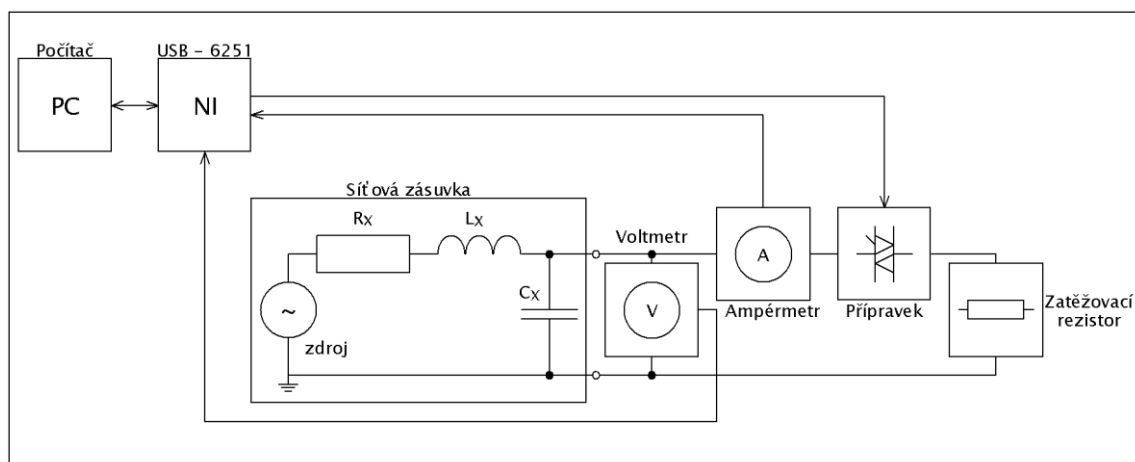
Obr 2.1: Vypínací charakteristiky jističů [5]

Připojovaný zatěžovací rezistor musí být co nejmenší, aby došlo k co největšímu proudovému zatížení. Zároveň nesmí dojít k většímu proudovému zatížení, než by snesl jistič. Napětí sítě udávané distributorem je 230 V s tolerancí $\pm 10\%$.

Pro výpočet minimální velikosti zátěže tedy uvažujeme maximální hodnoty napětí ($U_{\max} = 253\text{ V}$) a proudu ($I_{\max} = 48\text{ A}$) a vycházíme z Ohmova zákona.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{253}{48} = 5,27\Omega$$

Zapojení měřicí aparatury je zřejmé z blokového schématu na Obr 2.2.



Obr 2.2: Zapojení aparatury pro měření impedance napájecí sítě

Jako ampérmetr v měřícím obvodu byla použita proudová sonda PAC 12, která dokáže měřit stejnosměrný i střídavý proud s měřicími rozsahy 0,2-60 A špičkových, 0,4-60 A stejnosměrných, 0,5-600 A špičkových a 0,5-600 A DC. Kmitočtový rozsah je DC-10 kHz. Má napěťový výstup 600 mV AC/DC s převodovým poměrem 1 A/10 mV, respektive 1 A/1 mV (vstup/výstup). Dokáže měřit s přesností $\leq 1,5\%$ pro nižší měřicí rozsah a u vyššího rozsahu je udávaná přesnost $\leq 2\%$ [8].

Zatěžovací rezistor byl sestaven z 3 paralelně zapojených 19Ω reostatů, z nichž výkon každého reostatu činil $P = 500\text{ W}$. Celková naměřená hodnota odporu této sestavy byla $R = 5,4\Omega$ a celkový výkon sestavy $P = 1,5\text{ kW}$.

2.2 Popis ovládacího přípravku

Hlavní otázkou zde bylo, zda použít jako spínací prvek polovodič nebo kontaktní spínač. Výhodou polovodiče je hlavně vysoká rychlost spínání a na rozdíl od kontaktního spínače při spínání nedochází k elektrickému oblouku, ke kterému dochází při odskakování kontaktů. Dalším plusem pro polovodič je fakt, že má velmi malé až zanedbatelné elektromagnetické rušení.

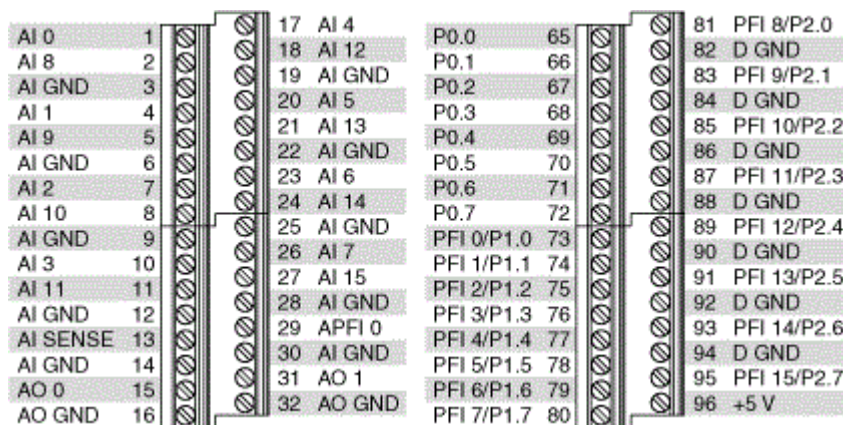
Jako ovládací přípravek pro připojování zatěžovacího rezistoru byl proto zvolen obvod řízený procesorem s výkonovým triakem BTA41 B, který je stavěný na trvalé zatížení proudem až 40 A. Maximální proud pro tento obvod činí 300 A po dobu jedné půlperiody, to znamená, že 50 A může tímto obvodem procházet 600 period ($t = 12$ s při frekvenci $f = 50$ Hz), aniž by došlo ke zničení. Na triaku je úbytek napětí $\Delta U = 1,8$ V, to je při proudu $I = 50$ A výkon $P = 90$ W, na což není přípravek přizpůsoben, jelikož je zde malý chladič. To znamená, že musíme zkrátit dobu přetížení, aby nedošlo k překročení maximální provozní teploty PN přechodu ($T_j = 125$ °C), které by vedlo k destrukci křemíkové součástky a zároveň zavést krátkou dobu na vychladnutí PN přechodu mezi jednotlivými spínání.

2.3 Měřicí karta Ni-Daq USB 6251

K propojení měřicího přípravku a počítače byla použita externí měřicí karta National Instruments USB-6251.



Obr 2.3: Měřicí karta Ni-Daq USB 6251



Obr 2.4: Měřicí karta Ni-Daq USB 6251 – svorky

- 16 analogových vstupů s rozlišením 16 bit, maximální vzorkovací frekvence 1,25MS/s
- 2 analogové výstupy s rozlišením 16bit, maximální vzorkovací frekvence 2,86MS/s
- Digitální vstupy/výstupy - 24 pro zasouvací svorky nebo 32 pro šroubové svorky
- 2 čítače/časovače s rozlišením 32bit
- Ovládání přes USB sběrnici[7]

3 Vlastní měření a zpracování naměřených data

3.1 Popis měření impedance napájecí sítě

Zapojili jsme aparaturu podle blokového schématu na Obr 2.2 a spustili předem vytvořený algoritmus, naprogramovaný v Matlabu. Pro přesnější zpracování měření bylo zvoleno 30 opakování, které by mělo zajistit přesnější získání hledané hodnoty impedance napájecí sítě.

Na obrázcích Obr 3.1, Obr 3.3 a Obr 3.5 je vidět průběh napětí a proudu před a při připojení zatěžovacího rezistoru. Napětí před připojením zatěžovacího rezistoru odpovídá napětí napájecí sítě naprázdno. Po připojení zatěžovacího rezistoru dojde k poklesu napětí a k nárůstu proudu. Jednotlivé průběhy napětí se vymezily na napětí před připojením zátěže a napětí s připojenou zátěží. Vzorek proudu byl vybrán pouze v části s připojenou zátěží. Připojení zátěže indikoval nenulový proud. Vybrané části průběhů musely být vybrány jako celé násobky period a vzorky před připojením zátěže a při připojené zátěži od sebe musely být vzdáleny taktéž celým násobkem periody, aby bylo možné vypočítat fázový posun mezi těmito vzorky. Z těchto vybraných částí průběhů napětí a proudu se pomocí FFT vypočítal fázový úhel (α). Dále byly u těchto průběhů zjištěny jejich amplitudy (U_M , I_M). Efektivní hodnoty (U_{ef} , I_{ef}) byly určeny podle vzorce (5) a (6). Hodnoty amplitud se poté dosadily v případě napětí do vzorce (2), v případě proudu do vzorce (3) a efektivní hodnoty do vzorců (6) a (7)

$$\mathbf{U}_M = |U_M|e^{j\alpha} \quad (2)$$

$$\mathbf{I}_M = |I_M|e^{j\alpha} \quad (3)$$

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (4)$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (5)$$

$$\mathbf{U} = |U_{ef}|e^{j\alpha} \quad (6)$$

$$\mathbf{I} = |I_{ef}|e^{j\alpha} \quad (7)$$

Získané fázory se dosadily do vzorce (1), čímž jsme získali fázor impedance. Ze vzorce (8) je zřejmý přepočítání impedance z exponenciálního do složkového tvaru.

$$\mathbf{Z} = |Z|e^{j\alpha} = |Z|\cos\alpha + j|Z|\sin\alpha = R + jX \quad (8)$$

Ze série vzorků se poté vypočítal aritmetický průměr podle vzorce (9).

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{n} \sum_{1}^n \mathbf{Z}_n \quad (9)$$

Příklad výpočtu jednoho naměřeného vzorku:

Naměřené hodnoty:

$$U_1 = 307,838e^{j145^\circ 18' 8''} \text{ V} \quad I_1 = 0 \text{ A}$$

$$U_2 = 291,2117e^{j138^\circ 2' 58''} \text{ V} \quad I_2 = 54,8119e^{j134^\circ 41' 18''} \text{ A}$$

Výpočet:

$$Z = \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2} = \frac{307,838e^{j145^\circ 18' 8''} - 291,2117e^{j138^\circ 2' 58''}}{-54,8119e^{j134^\circ 41' 18''}} = 0,7545e^{-j106^\circ 40' 8''} \Omega$$

$$\Rightarrow |Z| = 0,7545 \quad \alpha = -106^\circ 40' 8''$$

$$Z = |Z| \cos(-106^\circ 40' 8'') + j|Z| \sin(-106^\circ 40' 8'') = (-0,2164 - j0,7228) \Omega$$

Výpočet nejistot

Standardní nejistota typu A je výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru a vypočítá se dle vzorce (10). Směrodatná odchylka je dána vztahem (11)[6].

$$u_A = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (10)$$

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (11)$$

Standardní nejistota typu B se vypočítá jako výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru zdroje nejistoty podle vzorce (12). Celková standardní nejistota typu B se vypočítá jako odmocnina součtu kvadrátů jednotlivých nejistot typu B veličiny x podle vzorce (13)[6].

$$u_B = \frac{\Delta_Z}{\Theta} \quad (12)$$

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_i u_{Bi}^2} \quad (13)$$

Dle vzorce (14) získáme kombinovanou standardní nejistotu[6].

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (14)$$

Rozšířená nejistota se udává u výsledku měření a vypočítá se dle vzorce (15)[6].

$$U = k_u u \quad (15)$$

Nejistota nepřímých měření je nejistota přenesená z naměřených veličin na veličiny vypočítané. Pokud se veličina vypočítává ze vztahu (16), pak nejistota vypočítané veličiny je dána vztahem (17). A_i je koeficient citlivosti, pro který platí vztah (18)[6].

$$y = f(x_i) \quad (16)$$

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(x_i)} \quad (17)$$

$$A_i = \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \quad (18)$$

Příklad výpočtu nejistoty jednoho naměřeného souboru hodnot:

Konstanty:

$n = 30$ počet měření

$T = 0,02 \text{ s}$ perioda síťového napětí

$\Theta = \sqrt{3}$ zvoleno rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$k_u = \sqrt{3}$ koeficient rozšíření pro rovnoměrné rozdělení náhodné veličiny

$f_{NI} = 1,25/3 \text{ MHz}$ vzorkovací frekvence 1 ze 3 vstupů karty Ni-Daq 6251

$f_{PAC} = 10\text{kHz}$ vzorkovací frekvence proudové sondy PAC12

$TP_V = 1 \%$ třída přesnosti voltmetru v procentech z naměřené hodnoty

$TP_A = 1,5 \%$ třída přesnosti ampérmetru v procentech z naměřené hodnoty

Výpočet:

$$u_{A(U_1)} = \frac{s(|U_1|)}{\sqrt{n}} = \frac{1,0105}{\sqrt{30}} = 0,1845$$

$$u_{A(U_2)} = \frac{s(|U_2|)}{\sqrt{n}} = \frac{0,9202}{\sqrt{30}} = 0,168$$

$$u_{A(I_2)} = \frac{s(|I_2|)}{\sqrt{n}} = \frac{0,156}{\sqrt{30}} = 0,0285$$

$$u_{B(U_1)} = \sqrt{AA_{(U_1)}^2 + u_{B(\text{převodníku})}^2} = \sqrt{0,2558^2 + 1,7864^2} = 1,8046$$

$$u_{B(U_2)} = \sqrt{AA_{(U_2)}^2 + u_{B(\text{převodníku})}^2} = \sqrt{0,2509^2 + 1,6903^2} = 1,7088$$

$$\begin{aligned} u_{B(I_2)} &= \sqrt{AA_{(I_2)}^2 + u_{B(\text{převodníku})}^2} = \sqrt{AA_{(I_2)}^2 + \left(\frac{|\bar{I}_2| \cdot TP_A}{\Theta}\right)^2} = \\ &= \sqrt{0,0112^2 + 0,4764^2} = 0,4766 \end{aligned}$$

AA je nejistota typu B, vypočítaná z hodnot uvedených v katalogovém listu měřicí karty Ni-Daq 6251 [7]. Nejistota typu B převodníku ($u_{B(\text{převodníku})}$) obsaženého v měřicím zařízení se spočítá stejně jako v případě $u_{B(I_2)}$.

$$U_{(U_1)} = k_u \sqrt{u_{A(U_1)}^2 + u_{B(U_1)}^2} = 3,1419$$

$$U_{(U_2)} = k_u \sqrt{u_{A(U_2)}^2 + u_{B(U_2)}^2} = 2,974$$

$$U_{(I_2)} = k_u \sqrt{u_{A(I_2)}^2 + u_{B(I_2)}^2} = 0,8269$$

$$\begin{aligned} U_{|Z|} &= \sqrt{\left(\frac{\delta Z}{\delta U_1}\right)^2 U_{(U_1)}^2 + \left(\frac{\delta Z}{\delta U_2}\right)^2 U_{(U_2)}^2 + \left(\frac{\delta Z}{\delta I_2}\right)^2 U_{(I_2)}^2} = \\ &= \sqrt{\left(-\frac{1}{|\bar{I}_2|}\right)^2 U_{(U_1)}^2 + \left(\frac{1}{|\bar{I}_2|}\right)^2 U_{(U_2)}^2 + \left(\frac{|\bar{U}_1| - |\bar{U}_2|}{|\bar{I}_2|^2}\right)^2 U_{(I_2)}^2} = 0,0788 \end{aligned}$$

⇒ Ve výsledku bude uvedena nejistota po zaokrouhlení ($\pm 0,08$)

Nejistota reálné a imaginární složky impedance se spočítá úplně stejně jako nejistota absolutní hodnoty impedance, akorát místo absolutních hodnot ($|X|$) se při výpočtu reálné složky použijí reálné složky veličin ($\text{Re}(X)$) a při výpočtu imaginární složky se použijí imaginární složky ($\text{Im}(X)$). Výpočet nejistoty fázového posunu se liší dosazováním fázových úhlů ($\alpha_{(X)}$) místo absolutních hodnot, ale také výpočtem nejistoty typu B pro fázové posuny měřených veličin, které se vypočítají následovně.

$$u_{B(\alpha U_1)} = \left(\frac{\frac{360}{2f_{NI}T} \cdot \frac{180}{\pi}}{\Theta} \right) = 0,000218$$

$$u_{B(\alpha U_2)} = \left(\frac{\frac{360}{2f_{NI}T} \cdot \frac{180}{\pi}}{\Theta} \right) = 0,000218$$

$$u_{B(\alpha I_2)} = \left(\frac{\frac{360}{2f_{PAC}T} \cdot \frac{180}{\pi}}{\Theta} \right) = 0,0091$$

Chyby jsou u výsledků uváděny následujícím způsobem:

$$\mathbf{X} = (|\bar{X}|e^{j\alpha_X} \pm U_{|X|}e^{jU(\alpha_X)}) \text{ [jednotky]}$$

$$\mathbf{X} = ((\text{Re}(X) + j \cdot \text{Im}(X)) \pm (U_{\text{Re}(X)} + j \cdot U_{\text{Im}(X)})) \text{ [jednotky]}$$

Výpočet odporu prodlužovacího kabelu použitého při měření.

Dané hodnoty:

$$\rho = 0,0178 \, \Omega\text{mm}^2/\text{m} \qquad S = 1,5 \, \text{mm}^2 \qquad l = 5 \, \text{m}$$

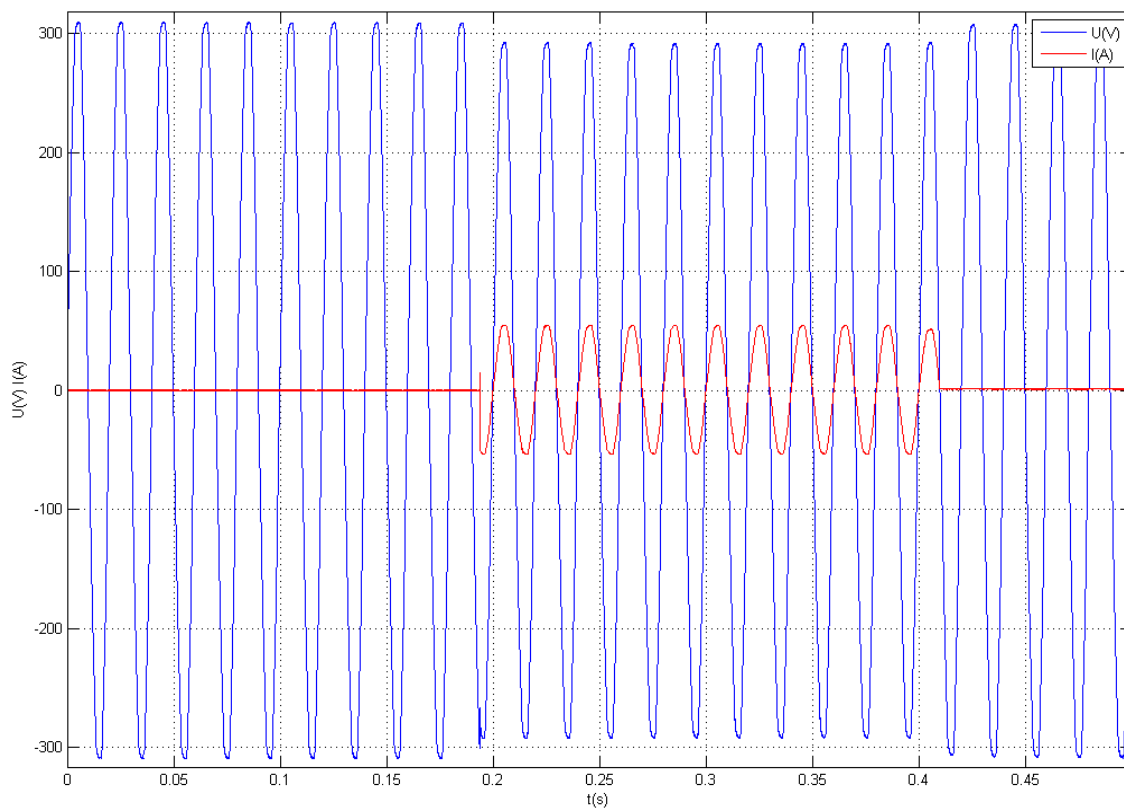
Výpočet:

$$R = \frac{\rho \cdot 2l}{S} = \frac{0,0178 \cdot 2 \cdot 5}{1,5} = 0,1187 \, \Omega$$

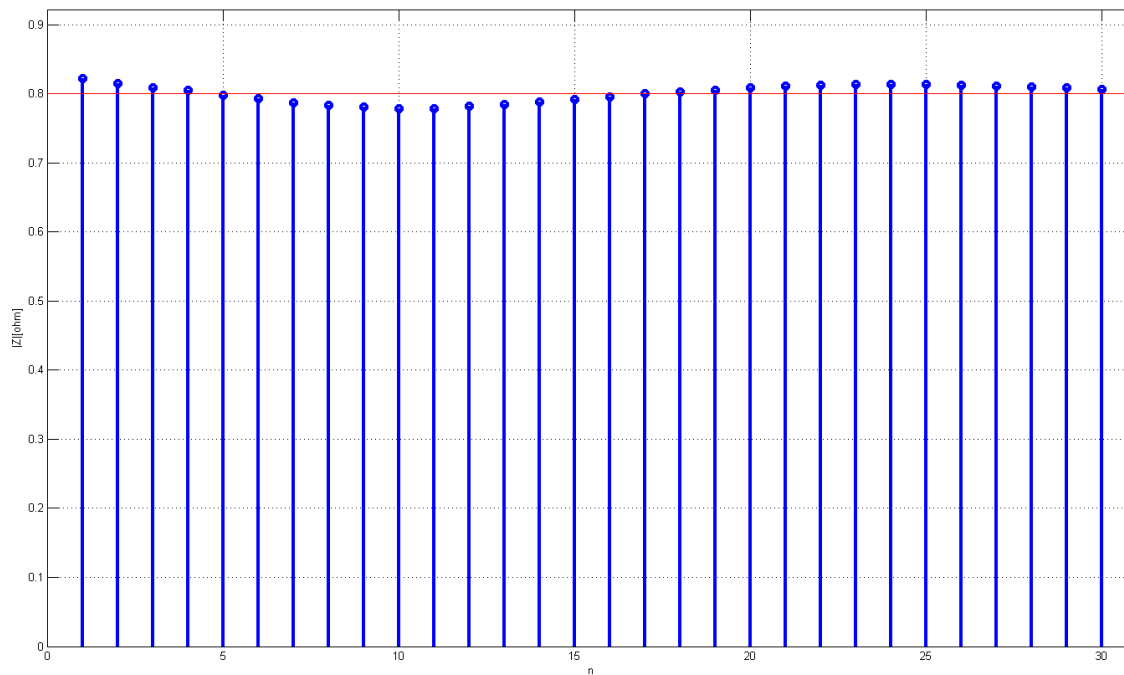
Vypočtená hodnota ovlivňuje pouze reálnou složku impedance. Dle odhadu, dalších 20 – 60 mΩ mají přechodové odpory spojů koncovek na prodlužovacím kabelu.

$$\Rightarrow R = 0,1387 \text{ až } 0,1787 \, \Omega$$

3.1.1 Měření impedance napájecí sítě v zásuvce na laboratorním stole



Obr 3.1: Ukázka průběhu napětí a proudu



Obr 3.2: Vypočítané absolutní hodnoty fázoru impedance naměřené na laboratorním stole

Na obrázku Obr 3.2 jsou vidět vypočítané jednotlivé hodnoty impedance pro každý z 30 naměřených vzorků průběhů napětí a proudu. Červenou čarou je znázorněn aritmetický průměr těchto vypočítaných hodnot impedance sítě. V zásuvce na laboratorním stole byla vyhodnocena impedance:

a) Z amplitud napětí a proudu

$$Z = (0,80e^{-j105^\circ} \pm 0,08e^{j4^\circ}) \Omega$$

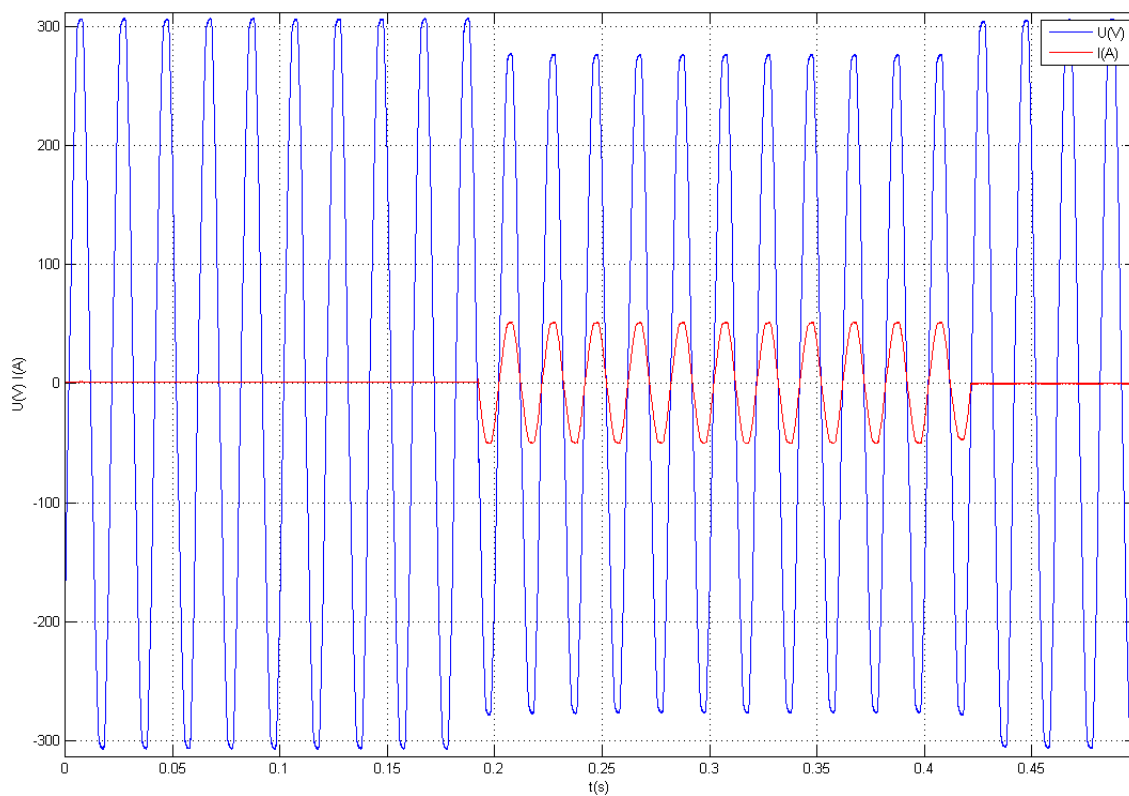
$$Z = ((-0,20 - j0,77) \pm (0,08 + j0,12)) \Omega$$

b) Z efektivních hodnot napětí a proudu

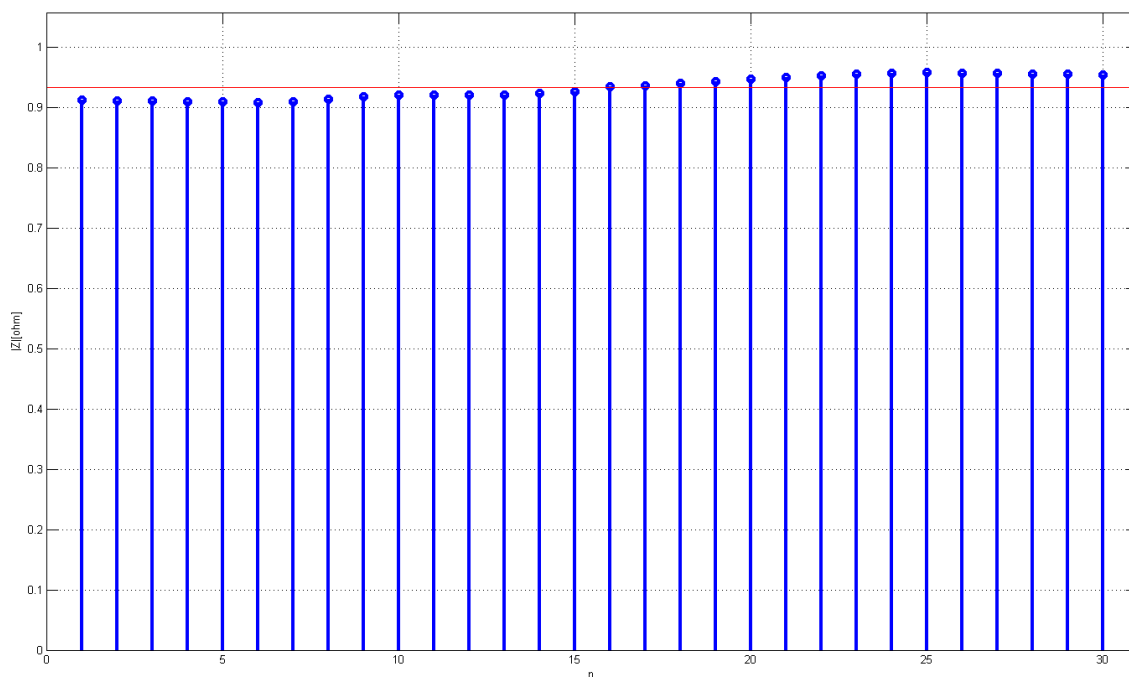
$$Z = (0,82e^{-j106^\circ} \pm 0,09e^{j4^\circ}) \Omega$$

$$Z = ((-0,22 - j0,79) \pm (0,09 + j0,13)) \Omega$$

3.1.2 Měření impedance napájecí sítě v zásuvce na laboratorním stole s prodlužovacím kabelem



Obr 3.3: Ukázka průběhu napětí a proudu



Obr 3.4: Vypočítané absolutní hodnoty fázoru impedance na laboratorním stole s prodlužovacím kabelem

Na obrázku Obr 3.4 jsou vidět vypočítané jednotlivé hodnoty impedance pro každý z 30 naměřených vzorků průběhů napětí a proudu. Červenou čarou je znázorněn aritmetický průměr těchto vypočítaných hodnot impedance sítě. V zásuvce na laboratorním stole s použitím prodlužovacího kabelu byla vyhodnocena impedance:

c) Z amplitud napětí a proudu

$$\mathbf{Z} = (0,93e^{-j121^\circ} \pm 0,09e^{j4^\circ}) \Omega$$

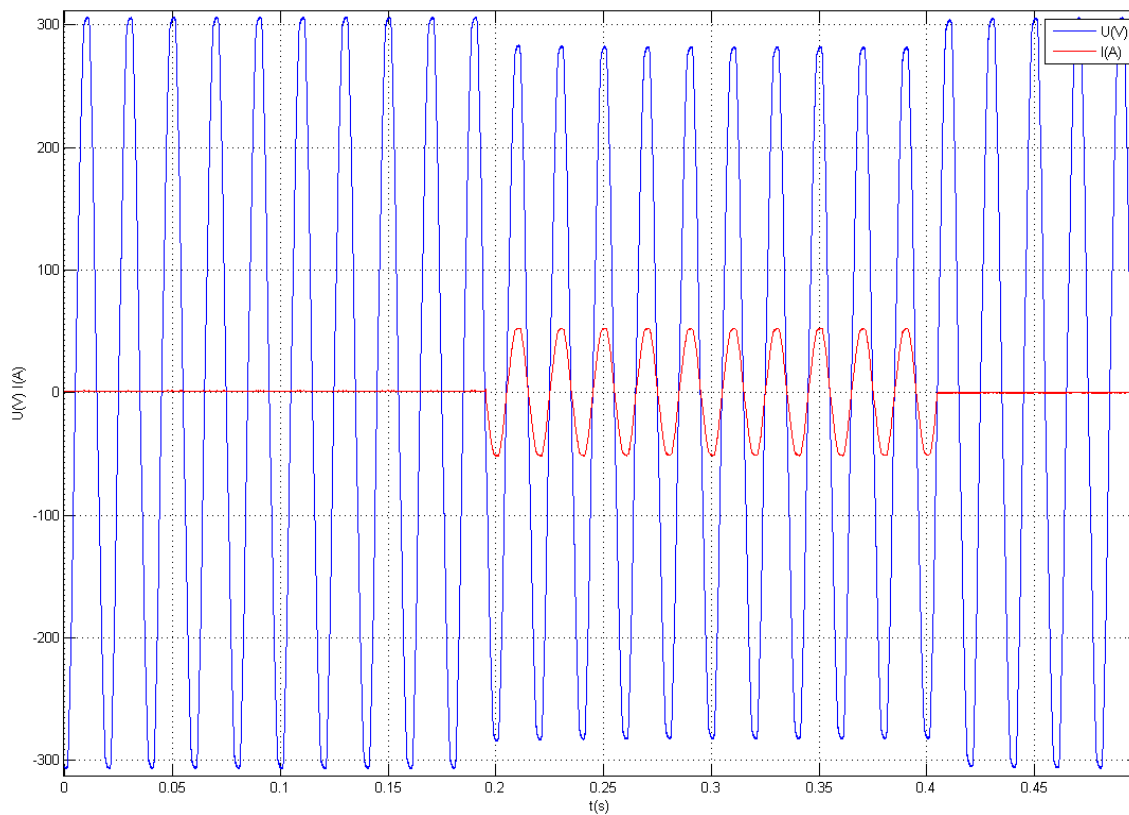
$$\mathbf{Z} = ((-0,48 - j0,80) \pm (0,09 + j0,14)) \Omega$$

d) Z efektivních hodnot napětí a proudu

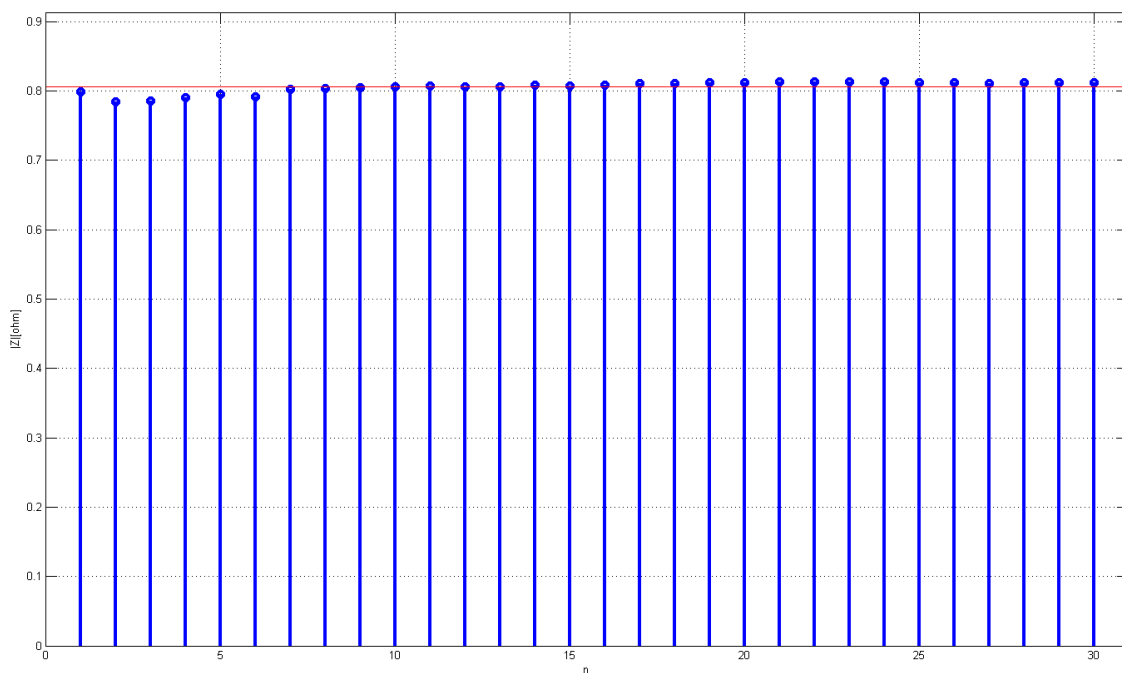
$$\mathbf{Z} = (0,96e^{-j121^\circ} \pm 0,09e^{j4^\circ}) \Omega$$

$$\mathbf{Z} = ((-0,50 - j0,82) \pm (0,09 + j0,15)) \Omega$$

3.1.3 Měření impedance napájecí sítě v zásuvce na rozvodné skříni s prodlužovacím kabelem



Obr 3.5: Ukázka průběhu napětí a proudu



Obr 3.6: Vypočítané absolutní hodnoty fázoru impedance na rozvodné skříni s prodlužovacím kabelem

Na obrázku Obr 3.6 jsou vidět vypočítané jednotlivé hodnoty impedance pro každý z 30 naměřených vzorků průběhů napětí a proudu. Červenou čarou je znázorněn aritmetický průměr těchto vypočítaných hodnot impedance sítě. V zásuvce na rozvodné skříně s použitím prodlužovacího kabelu byla vyhodnocena impedance:

e) Z amplitud napětí a proudu

$$\mathbf{Z} = (0,81e^{-j117^\circ} \pm 0,09e^{j4^\circ}) \Omega$$

$$\mathbf{Z} = ((-0,37 - j0,72) \pm (0,09 + j0,11)) \Omega$$

f) Z efektivních hodnot napětí a proudu

$$\mathbf{Z} = (0,83e^{-j118^\circ} \pm 0,09e^{j4^\circ}) \Omega$$

$$\mathbf{Z} = ((-0,38 - j0,73) \pm (0,09 + j0,13)) \Omega$$

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provést rešerši metod používaných k měření impedance napájecí sítě v normálním provozním stavu, ze standardních měřících přístrojů dostupných na ústavu MTI sestavit měřící aparaturu pro měření impedance napájecí sítě, odzkoušet funkčnost měření a vyhodnotit výsledky tohoto měření.

V rešeršní části práce jsem se seznámil s třemi metodami měření impedance napájecí sítě. Pro sestavení měřící aparatury jsem vybral si pasivní metodu, jelikož se jevila jako nejjednodušeji realizovatelná v laboratorních podmínkách ústavu MTI, a zároveň byla jednoduše automatizovaně řiditelná. Dalším důvodem pro výběr pasivní metody byl celkem jednoduchý výpočet výsledných hodnot impedance z naměřených hodnot.

Řídicí obvod měřící aparatury se skládá ze stolního počítače a obvodu s výkonovým triakem řízeným mikroprocesorem přes měřící kartu Ni-Daq USB 6251. Automatizované měření je řízeno předem naprogramovaným algoritmem v programu MATLAB.

Data získaná měřením jsem dále zpracovával v programu MATLAB podle postupu popsaného v kapitole 3.1. Zdrojové kódy pro měření a zpracování dat jsou k dispozici na příloženém CD.

Z naměřených a vypočítaných hodnot vyplývá, že impedance napájecí sítě má podle předpokladu induktivní charakter, protože její imaginární složka předbíhá reálnou složku. Impedance napájecí sítě je velmi malá a ovlivňuje ji i zapojení prodlužovacího kabelu do měřeného obvodu, který má sám o sobě také velmi malou impedanci. Důkazem toho jsou výsledky impedance vypočtené z hodnot naměřených na laboratorním stole s použitím prodlužovacího kabelu, kde je reálná složka impedance $((0,5 \pm 0,09) \Omega)$ větší právě o hodnotu odporu prodlužovacího kabelu $((0,16 \pm 0,02) \Omega)$, než reálná složka impedance vypočtená z naměřených hodnot přímo na laboratorním stole bez prodlužovacího kabelu $((0,22 \pm 0,09) \Omega)$. Rozdílem impedancí po odečtení hodnoty odporu prodlužovacího kabelu by měla vyjít 0. S přihlédnutím na nejistoty naměřených hodnot se tento skutek naplňuje $(0,5 - 0,22 - 0,16 = 0,12)$.

Důležitým poznatkem, viditelným na grafech absolutních hodnot fázorů jednotlivých měření, je, že se impedance v čase mění. To je dáno vypínáním a zapínáním spotřebičů po celé délce rozvodné napájecí sítě.

Literatura

- [1] Agilent Technologies. *Agilent Impedance Measurement Handbook* [online]. USA : Agilent Technologies, 2009 [cit. 2011-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>>.
- [2] LANGKOWSKI, H, et al. Grid Impedance Determination – Relevancy for Grid Integration of Renewable Energy Systems. *Industrial Electronics*. 2009, 35, s. 516. Dostupný také z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5414975>>. ISSN 1553-572X.
- [3] LIPOVSKÝ, Ing. Ivo. Impedance, nebo odpor poruchové smyčky?. *ELEKTRO*. 2007, 3, s. 36-38. Dostupný také z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/elektro/2007/el030736.pdf>>.
- [4] ASIMINOAEI, Lucian, et al. Implementation and test of an online embedded grid impedance estimation technique for PV inverters. *Industrial Electronics*. 2005, 4, s. 1136. Dostupný také z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1490704>>. ISSN 0278-0046.
- [5] Elektrické přístroje : Jističe. In *Skripta : Skripta 3* [online]. Valašské Meziříčí : Integrovaná střední škola Valašské Meziříčí, 2005 [cit. 2011-05-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.jsmilek.cz/skripta%20pdf/esp%203%20jistice%20skripta.pdf>>.
- [6] KRETSCHMEROVÁ PH.D., Ing. Lenka. *Výpočet nejistot* [online]. Liberec : TUL, 2007. 4 s. Přednášky. TUL. Dostupné z WWW: <http://rss-m.fm.tul.cz/files/mt1/prednasky/vypocet_nejistot.pdf>.
- [7] *NI-Datasheet-ds-20* [online]. United States : National Instruments, 2009 [cit. 2011-05-25]. Dostupné z WWW: <<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-20/lang/en>>.
- [8] Klešťové převodníky proudu CHAUVIN ARNOUX. In *Měřicí a testovací přístroje* [online]. Brno, Česká republika : GHV Trading, 2010 [cit. 2011-05-25]. Dostupné z WWW: <www.ghvtrading.cz/download.php?fileid=242>.
- [9] ČSN EN 6155-3. Elektrická bezpečnost v nízkonapětových rozvodných sítích se střídavým napětím do 1 kV a se stejnosměrným napětím do 1,5 kV – Zařízení ke zkoušení, měření nebo sledování činnosti prostředků ochrany – Část 3 – Impedance smyčky

Seznam příloh

Obsah CD-ROM

